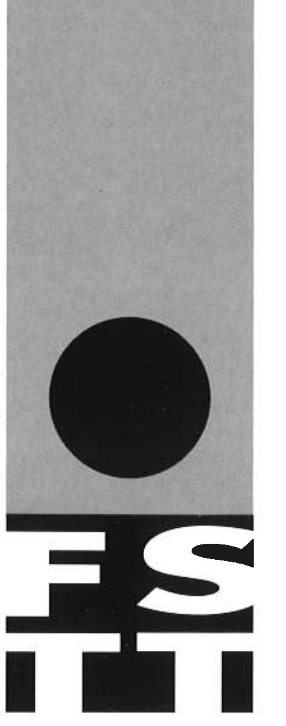
CAHIERS TECHNIQUES

FSTT

OBJECTIFS ET MOYENS DES ETUDES DE SOL POUR LES PROJETS DE MICROTUNNELS

N°1 - Mai 1994



Construisons ensemble sans tranchée

FSTT
Comité Français pour les Travaux Sans Tranchée

3, rue Berri
75008 PARIS
Tél : 43.59.95.61
Fax : 43.59.95.60

L'OBJET DE L'ASSOCIATION

L'association FSTT de caractère scientifique et technique a pour objet la promotion, la connaissance, la formation et la pratique des méthodes sans tranchée pour les travaux relatifs aux canalisations des réseaux enterrés de toute nature.

Ces méthodes sans tranchée s'entendent en souterrain, sans creusement de tranchée pour l'entretien, la rénovation et le remplacement des ouvrages existants et la construction d'ouvrages neufs de réseaux publics, privés ou concessionnaires. Ce domaine d'activité couvre toutes les techniques de repérage ou de cartographie de ces réseaux.

Le champ d'application s'étend au domaine non visible soit tout ouvrage enterré de dimension inférieur ou égal à 1200 mm ou équivalent s'il s'agit d'un ouvrage non circulaire.

LES STATUTS DE LA FSTT

Créé le 4 Juillet 1990, le Comité Français pour les travaux sans tranchée - FSTT dans sa dénomination française et French Society for Trenchless Technology pour ses rapports internationaux est une association régie par la loi 1901 à but non lucratif. Il se compose de membres fondateurs, de membres actifs et de membres honoraires. Cette association est administrée par un conseil élu par assemblée générale ; ce même conseil d'administration élit un bureau exécutif.

LES OBJECTIFS DE L'ASSOCIATION

Les diverses actions doivent se développer selon plusieurs axes :

- La promotion des techniques sans tranchée (faire connaître ces techniques par de l'assistance, expertise en encouragement et même enseignement).
- La réglementation - normalisation (élaboration de normes, de cahiers techniques contractuels, réglementations diverses).
- La recherche (matériel, guidage, reconnaissance, matériaux, outils d'aide au diagnostic...).
- L'information, Communication (revues, brochures, livres, conférences, colloques, centre de documentation).
- Vie associative (Missions, Voyages d'études, séminaires, remises de prix).



Construisons ensemble sans tranchée

OBJECTIFS ET MOYENS DES ETUDES DE SOL POUR LES PROJETS DE MICROTUNNELS

Document établi par

Atelier 2 : *Reconnaissances géophysiques et géotechniques*

et

Atelier 3 : *Interaction sol-structure*

PARTICIPANTS

Liste des personnes ayant participé à l'élaboration de ce document :

les animateurs de l'atelier n°2

E. Leca	*L.C.P.C.*
R. Lagabrielle	*L.C.P.C.*

l'animateur de l'atelier n°3

R. Kastner	*INSA de Lyon*

et

J.-M. Balthassat	*B.R.G.M.*
Y. Bourdeau	*I.N.S.A. de Lyon*
F. Bourgoin	*SADE*
P. Bousquet-Jacq	*TERRASOL*
J.-P. Brazzini	*G.D.F.-D.E.T.N.*
D. Gailly	*BONNA*
S. Geraads	*GEOMEGA*
A. Guilloux	*TERRASOL*
J.-Ph. Hermine	*TERRASOL*
P. Huet	*ETERNIT*
J.M. Joussin	*ETERNIT*
A. Lothon	*G.D.F.-C.E.R.S.T.A. D.E.T.N.*
E. Morel	*E.U.D.I.L.*
J.-F. Ouvry	*B.R.G.M.*
J. Piraud	*B.R.G.M.*
G. Pottecher	*B.R.G.M.*
S. Québaud	*E.U.D.I.L.*
J. Schroeyers	*SADE*
S. Stringhetta	*G.D.F.-C.E.R.S.T.A. D.E.T.N.*
A. Tabbagh	*C.N.R.S.*

Ce document reflète l'état actuel de connaissance et de développement en matière de méthodes de réalisation et de moyens de reconnaissance ; certains aspects abordés dans cette présentation sont susceptibles d'évolution et pourront nécessiter ultérieurement des adaptations.



SOMMAIRE

OBJECTIFS ET MOYENS DES ETUDES DE SOL POUR LES PROJETS DE MICROTUNNELS

R. KASTNER*, E. LECA, R. LAGABRIELLE****

* : Laboratoire de Géotechnique n°304 de l'I.N.S.A. de Lyon
** : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

1. - NECESSITE DES RECONNAISSANCES

Les projets de microtunnels sont situés, en général, dans la tranche superficielle de terrain, comprise entre 2 m et 20 m de profondeur, où l'on rencontre le plus souvent des terrains meubles. Ceux-ci peuvent être regroupés en trois catégories principales, d'âge croissant :

- les remblais anthropiques,
- les formations superficielles (alluvions, moraines, limons éoliens...) qui se sont déposées sur un substratum plus ou moins érodé,
- les produits de l'altération en place de ce même substratum (arènes, altérites, argiles de décalcification, craie altérée...).

On rencontre aussi des terrains sédimentaires en place (marnes, calcaires, grès...).

Il est clair que, du fait de leur grande diversité, ces terrains ne présentent pas du tout les mêmes caractéristiques vis-à-vis des différentes techniques de creusement. De plus, chacun de ces terrains est susceptible de contenir des hétérogénéités naturelles ou artificielles, qui sont autant d'obstacles souvent infranchissables pour des appareils conçus pour des sols meubles. On peut citer en particulier :

- dans les remblais : les produits de démolition et de décharge (béton, ferrailles), les anciennes fondations, pieux ou puits oubliés, sans compter les conduites et réseaux divers actifs ou abandonnés ;
- dans les formations superficielles meubles : les blocs de roche dure, assez fréquents à la base des alluvions et toujours nombreux au sein des moraines, les éboulis de pentes enfouis dans les formations sédimentaires plus récentes ;
- dans le substratum : les zones indurées ou préservées de l'altération superficielle, dont la répartition est très souvent aléatoire.

L'étude de sol préalable à un projet de microtunnel comprendra donc deux aspects complémentaires :

- la reconnaissance géologique (au sens large, c'est-à-dire : lithologie, géotechnique, hydro-géologie) ; elle est d'autant plus importante que le microtunnel est profond et la technique sensible aux variations de

géologie. Cette étape peut servir à optimiser le tracé de l'ouvrage ;

- la reconnaissance des obstacles, d'autant plus nécessaire que l'ouvrage sera superficiel avec interférences possibles avec toutes sortes d'obstacles.

2. - COÛT DES RECONNAISSANCES

Si les travaux classiques en tranchée pouvaient se satisfaire de reconnaissances sommaires, il n'en est pas de même pour les microtunnels, et ce malgré le faible montant unitaire des travaux :

- d'une part l'immobilisation de capital que représente la machine, et donc l'économie du chantier, est incompatible avec un risque de blocage de celle-ci (qui nécessiterait un puits de "repêchage") et a fortiori avec un risque de perte irréversible (si le blocage survient dans un endroit inaccessible) ;

- d'autre part, les dommages éventuels aux ouvrages en place peuvent entraîner des coûts de réparation importants, qui auraient pu être évités par une reconnaissance précise.

Bien entendu, plus la machine est sophistiquée et coûteuse, plus le chantier justifie une reconnaissance précise. Le ratio reconnaissances / travaux sera plus élevé pour les chantiers de microtunnels que pour les tunnels visitables, et ce d'autant plus qu'il s'agit, en général, de travaux de faible longueur. Un ratio de 5 à 15 % est tout à fait normal : ceci conduirait, par exemple, pour un microtunnel de 200 m x 5 kF / m = 1 MF de travaux, à un budget de reconnaissance de 100 kF.

La reconnaissance préalable est une dépense que l'on effectue pour diminuer le risque de surcoûts liés aux dommages ou à la perte de la machine et de l'ouvrage.

3. - OBJECTIFS DES RECONNAISSANCES

Comme pour les tunnels de plus gros diamètre, il paraît normal que les reconnaissances soient assurées par et aux frais du maître d'ouvrage, de telle sorte que leurs résultats soient joints à l'appel d'offres travaux, qu'une comparaison puisse être faite avec la solution en tranchée et qu'un partage équitable du risque "géologie + obstacles" soit, si possible, convenu, comme pour les travaux souterrains habituels.

Ceci dit, les études de sol poursuivent, dans le cas des microtunnels, quelques objectifs assez spécifiques :

a. étudier la faisabilité du microtunnel : pour certains diamètres et dans l'état actuel des techniques, il peut y avoir des difficultés importantes : ainsi pour la traversée d'un substratum rocheux, ou d'argiles gonflantes au contact de l'eau, ou tout simplement de fondations profondes oubliées ;

b. caler le profil en long (sous réserve d'en avoir le loisir pour les galeries hydrauliques) et éventuellement optimiser le tracé en plan, c'est-à-dire la ligne brisée puits-tunnels et la distance entre puits, compte tenu des emplacements possibles pour les puits et des conditions de terrain.

Dans le cas particulier des microtunneliers, les études de sol permettent aussi :

c. d'estimer correctement le coût des puits, qui représente couramment entre 20 % et 40 % du prix de l'ouvrage, et qui augmente très vite s'il faut étancher et / ou consolider des terrains meubles sous la nappe ;

d. d'acquérir les paramètres nécessaires au choix du microtunnelier et des tuyaux et au dimensionnement du système de poussage, et corrélativement évaluer la durée du chantier.

4. - MOYENS DE RECONNAISSANCE ET DONNEES A ACQUERIR

4,1. - Recherche de données antérieures

Plus que jamais, la consultation des documents antérieurs (cartes géologiques, banques de données de sondages, dossiers d'ouvrages antérieurs, visites de chantiers voisins...) est indispensable dans le cas des microtunnels :

- d'abord pour localiser au mieux les réseaux et obstacles souterrains actuels ou oubliés (cartes des concessionnaires, vieux plans, archéologie...) ;

- ensuite pour évaluer au mieux le niveau probable et maximal de la nappe au cours des travaux (à la fois pour la construction des puits et pour le mode de progression de la machine). Ce paramètre essentiel ne peut être déduit de la seule piézométrie mesurée lors des sondages de reconnaissance, sujette à variations importantes au gré des intempéries, des crues ou de l'arrêt de captages voisins.

4,2. - Estimation des surcharges

L'existence de surcharges peut s'avérer importante pour le dimensionnement des conduites posées ou foncées à faible profondeur. On distingue :

- des surcharges permanentes, transmises par les fondations des bâtiments ;

- des surcharges mobiles dues à la circulation.

Bien que ne faisant pas partie des contraintes géologiques, ces surcharges se transmettent de manière différente en profondeur et latéralement selon la nature du terrain. Celles dues aux fondations d'ouvrages voisins devront donc être estimées avec soin lors de la phase d'examen des dossiers.

4,3. - Besoins en reconnaissances

Les besoins en reconnaissances d'un projet de microtunnel dépendent fortement du type de technique de réalisation choisie. Une liste détaillée des besoins propres à chaque technique est donnée dans le tableau 1. On a choisi de se limiter à deux types de travaux :

- les réalisations de nouvelles installations (creusement au microtunnelier, fusée pneumatique, forage à la tarière, battage de tube, forage horizontal dirigé) ;

- le remplacement place pour place (éclatement de conduite, extraction de conduite, mange tube).

Le problème de la réhabilitation n'a pas été traité, dans la mesure où il s'agit plus dans ce cas d'auscultation d'ouvrage que de reconnaissance des terrains. Par ailleurs, l'ordre dans lequel apparaissent les techniques de reconnaissance recommandées n'est pas significatif ; les méthodes de reconnaissance géotechniques prioritaires sont repérées par un astérisque.

Les besoins en reconnaissances apparaissent dans la deuxième colonne du tableau 1. Ils incluent, selon les techniques de creusement, tout ou partie des informations suivantes :

- nature, épaisseur et position relative des différents terrains ;

- caractéristiques physiques des terrains : granulométrie, poids volumiques, teneur en eau, plasticité, susceptibilité au collage, perméabilité ;

- caractéristiques mécaniques des terrains : résistance, déformabilité, possibilité de fluage, propriétés de gonflement, abrasivité, dureté ;

- paramètres hydrogéologiques : présence de nappes d'eau souterraines, propriétés chimiques de l'eau ;

- localisation (x, y, z) des ouvrages existants connus et certitude de l'absence d'ouvrages anciens inconnus.

Pour obtenir ces données, deux types de moyens sont à la disposition du praticien :

- des moyens de reconnaissance géophysiques ;

- des moyens de reconnaissance géotechniques.

4,4. - Moyens de reconnaissances géophysiques

Les principales méthodes de reconnaissances géophysiques, que l'on applique ou que l'on peut envisager d'appliquer pour les reconnaissances préalables aux travaux sans tranchée sont données dans la quatrième colonne du tableau 1. Le tableau 2 décrit brièvement ces méthodes (à titre indicatif et de manière non exhaustive) et donne, pour chacune d'elles, les caractéristiques et principales limitations.

Les méthodes géophysiques remplissent plusieurs fonctions :

- reconnaître la nature et la répartition des matériaux du sous-sol traversés par l'ouvrage. Du fait de leur caractère continu, elles servent à optimiser l'implantation des forages de reconnaissance (carottés ou non). Les données obtenues grâce à ces derniers permettent l'étalonnage des mesures géophysiques qui à leur tour permettent d'étendre partout les résultats des forages. Il est donc indispensable de commencer la reconnaissance par la géophysique, avant les forages ;

- déceler les hétérogénéités ponctuelles qu'il est improbable de rencontrer en sondage, sous réserve bien sûr que ces méthodes révèlent effectivement les dits objets.

Le tableau 1 montre comment ces méthodes peuvent être utilisées pour apporter des éléments de réponse aux problèmes de reconnaissances propres à chaque technique de réalisation. Quatre méthodes sont le plus fréquemment citées (dans un ordre arbitraire). Il s'agit du radar de reconnaissance du sous-sol, de la radio-magnétotellurique (Radio-MT), du résistivimètre électrique ou électrostatique et du conductivimètre électro-magnétique. Ces quatre méthodes ont pour caractéristique commune de délivrer des profils continus avec un rendement élevé. Le radar permet une bonne mise en évidence des limites géométriques des matériaux (verticalement et horizontalement) avec des informations pauvres concernant la nature de ces matériaux ; c'est un excellent outil pour détecter les obstacles enterrés si le sous-sol n'est pas trop argileux. Les trois autres méthodes, quant à elles, décrivent la répartition horizontale des

matériaux avec une information plus riche concernant leur nature ; elles servent aussi à détecter les obstacles mais sans doute moins efficacement que le radar et sans donner beaucoup d'information sur leur profondeur et leur dimension ; leur coût est plus faible que celui du radar.

4,5. - Moyens de reconnaissances géotechniques

Les moyens de reconnaissances géotechniques, que l'on peut préconiser pour chaque technique de réalisation de microtunnels apparaissent dans la troisième colonne du tableau 1. Les particularités des essais géotechniques indiqués sont données dans le tableau 3.

La première investigation à mettre en oeuvre consiste à rassembler le maximum de données existantes par une enquête géologique, qui débutera par la consultation de la carte géologique du site du projet et se pousuivra par la recherche d'informations sur des projets identiques réalisés dans un contexte similaire, sur des projets différents mais réalisés à proximité (bâtiments avec sous-sols, par exemple), ou encore une consultation de la banque des données du sous-sol.

Ensuite, pour pouvoir mesurer les caractéristiques physiques des terrains, ce qui s'effectue essentiellement dans un laboratoire spécialisé, il est nécessaire de prélever des échantillons pour lesquels on peut tolérer un certain remaniement. Les prélèvements peuvent donc être effectués au moyen de sondages carottés, mais aussi de sondages à la tarière ou de puits creusés à la pelle hydraulique. Il est important de garder à l'esprit qu'un sondage ne peut pas mettre en évidence de blocs d'un diamètre supérieur au sien ; si l'on suspecte la présence de blocs de plus d'une dizaine de décimètres cubes, il faut impérativement réaliser des puits. La profondeur des sondages doit être choisie de manière à garder une certaine liberté pour modifier le profil en long prévisionnel sans devoir recommencer de nouveaux sondages.

Pour mesurer les caractéristiques mécaniques des terrains, on dispose d'essais en laboratoire pour lesquels il faut des échantillons intacts (ce qui exclut notamment les sondages à la tarière ou le carottier battu de petit diamètre) et des essais in situ suivants :

- le SPT (Standard Penetration Test), auquel beaucoup de constructeurs de microtunneliers font référence (très répandu hors des frontières françaises mais mis en oeuvre en France par peu de sociétés), qui fournit des échantillons remaniés et un indice de résistance à la pénétration, N, qui ne différencie pas effort de pointe et frottement latéral ;
- le pénétromètre statique ou CPT (Cone Penetration Test), qui permet de mesurer séparément effort de pointe et frottement latéral et offre des profils de mesure relativement continus, ce qui permet une corrélation assez fine avec la stratigraphie ; cet essai possède une certaine similitude avec les processus physiques mis en jeu par certaines techniques de microtunnels : un effort de frottement intense mesuré par le pénétromètre se traduira sûrement par des efforts de même nature à affronter lors du chantier par la machine ;
- le pénétromètre dynamique, qui fournit un indice de résistance à la pénétration ne faisant pas la part du frottement et de l'effort de pointe ; comme pour le pénétromètre statique, la mesure est assez continue et cet essai bon marché peut fournir des données qualitatives intéressantes sur la compacité des terrains (à utiliser cependant avec précaution) ;
- le forage pressiométrique, qui permet une identification des terrains si le forage est réalisé à la tarière et fournit des données sur la résistance et la déformabilité des terrains ; le module de déformation est nécessaire pour le dimensionnement des soutènements et parfois des tuyaux dans le cas des ouvrages réalisés au microtunnelier et n'est pas directement fourni par les essais de pénétration.

La présence d'une nappe d'eau et les variations du niveau de celle-ci sont recherchées en équipant les sondages de tubes crépinés, à relever périodiquement. La perméabilité des terrains peut être évaluée en laboratoire, mais aussi in situ, par des essais appropriés.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

Géophysique

Méthodes sismiques

BERTIN J. , 1981, Prospection électrique et sismique. La pratique des sols et fondations, chapitre 22, Ed. Moniteur.

LAVERGNE M. , 1986, Méthodes sismiques, Technip, 207 pp.

LYSIAK J.-L. , 1990, "Etude de génie civil par sismique réflexion haute résolution : traitement" Géologues, revue de l'UFG, n°93, pp. 17-22.

Méthode Radar

GARNEAU P.-A. , GOUPIL F. , ASTIER J.-L. , GERAADS S. , GEORGE B. , 1990, "Génie civil et subsurface : radar géologique", Géologues n°92, pp. 25-36.

GERAADS S. , 1991, "La prospection par radar", Les dossiers d'archéologie, n°162, pp. 79-80.

GERAADS S. , MACHET J.-M. , 1989, "Orly, un radar pour... la piste", Travaux, n°639, pp. 38-42.

POTTECHER G. , 1991, "Le radar géologique et les réseaux urbains", Gaz d'aujourd'hui, t.115, n°12, pp. 573-577.

Méthodes électriques et électromagnétiques

DABAS M. , JOLIVET A. , 1987, "Profilage électrique de subsurface par quadripôle tracté à contact continu avec le sol", Journées de la S.E.E., club 12, février 1987, 8 pp.

GERAADS S. , MOUNIR A. , JOLIVET A. , TABBAGH A. , 1992, "Un nouvel outil pour les reconnaissances préalables : le quadripôle électrostatique", Congrès No Dig 92, *No Trenches in Town*, Paris, pp. 195-201.

GRARD R. , TABBAGH A. , 1991, "A mobile four-electrode array and its application to the electrical survey of planetary grounds at shallow depths", Journal of Geophysical Research, vol. 96, n°B3, pp. 4117-4123.

MCNEIL J. D. , 1980, "Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers", Technical notes TN 6, Geonics Ltd, Toronto, 15 pp.

TABBAGH A. , HESSE A. , GRARD R. , 1992, "Détermination of electrical properties of the ground at shallow depth with an electrostatic quadripole : field trials on archeological sites", Geophysical Prospecting, 41, pp. 579-597.

Radio-M.T.

GUINEAU B. , DUPIS A. , 1973, "Dispositif pour la prospection magnétotellurique de subsurface", Agence Nationale pour la Valorisation de la Recherche, Paris, Brevet n°73-11-573.

LAGABRIELLE R. , 1986, "Les bases de la Radiomagnétotellurique", Revue de l'industrie minérale, Mines et carrières, octobre 1986, pp. 373-384.

BEYAERT G. , CHEVASSU G. , LAGABRIELLE R. , 1987, "Reconnaissance rapide de projets de tranchées par radiomagnétotellurique", Actes des journées SEE (Supélec), 4 et 5 février 1987, 7 pp.

CHEVASSU G. , LAGABRIELLE R. , 1990, "Radiomagnetotellurics apparent resistivity high velocity continuous profiling for shallow works", Proc. 6th Intern. Congress IAEG, Vol. 2, pp. 899-905.

CHEVASSU G. , GRISONI G. , LAGABRIELLE R. , 1990, "Reconnaissance des sols supports de chaussées par radiomagnétotellurique", Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n°166, pp. 73-82.

Prospection électrique en site aquatique

LAGABRIELLE R. , TEILHAUD S. , 1981, "Prospection de gisements alluvionnaires en site aquatique par profils continus de résistivité au fond de l'eau", Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées 114, pp. 17-24.

LAGABRIELLE R. , CHEVALIER M. , 1991, "Prospection électrique par courant continu en site aquatique", Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n°171, pp. 57-62.

Généralités

ASTIER J.-L. , 1971, Géophysique appliquée à l'hydrogéologie, Masson, Paris, 278 pp.

EFFENDIANTZ L. , 1989, "Evaluation des structures existantes", Tunnels et Ouvrages Souterrains, n°96, pp. 280-283.

SCOLLAR I. , TABBAGH A. , HESSE A. , HERZOG I. , 1990, "Archeological prospecting and remote sensing", Cambridge University Press, 674 pp.

BRGM, CGG, CFPG, LCPC, 1992, "Géophysique Appliquée : code de bonne pratique", diffusé par l'Union Française des Géologues.

FSTT, NANCIE, 1992, Guide international pour l'auscultation et la réhabilitation des conduites", 270 feuillets.

Géotechnique

Essais de Mécanique des Sols et des Roches

AMAR S. , JEZEQUEL J.-F. , 1972, "Essais en place et en laboratoire sur sols cohérents. Comparaison des résultats", Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 58, mars-avril., pp. 97-108.

AMAR S. , JEZEQUEL J.-F. , 1978, "Propriétés mécaniques des sols déterminées en place", Techniques de l'ingénieur, C220, 18 pp.

AMAR S. , MAGNAN J.-P. , 1980, "Essais de mécanique des sols en laboratoire et en place ; aide mémoire", Note d'Information Technique LCPC, 27 pp.

BAGUELIN F. , JEZEQUEL J.-F. , LE MEHAUTE A. , 1976, "Mesure des caractéristiques des sols par autoforage", Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Paris, n°81, pp. 63-72, janv.-fev..

BAGUELIN F. , JEZEQUEL J.-F. , SHIELDS D. H. , 1978, The pressuremeter and foundation engineering, Trans Tech Publications, Switerland, 617 pp.

BLIVET J.-C. , MIEUSSENS C. , 1990, "Détermination de la résistance au cisaillement des sols, en laboratoire. Essais à l'appareil triaxial. Essais de compression simple. Essais de cisaillement direct à la boîte. Essais de cisaillement direct alterné". Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, Projet de méthode d'essais LPC, 83 pp..

BISHOP A. W. , HENKEL D. J. , 1962, "The measurement of soil properties in the triaxial test", Edward Arnold Ltd, 2ème édition, réimprimé en 1964 et 1969, 228 pp.

CASSAN, 1978, Les essais in situ en mécanique des sols, Vol. 1 "réalisation et interprétation", Vol. 2 "applications et méthodes de calcul", Eyrolles, 786 pp.

HEAD K. M. , 1986, Manual of soil laboratory testing, Vol. 1 "Soil Classification and Compaction Tests", Vol. 2 "Permability, Shear Strength and Compressibility Tests, Vol. 3 "Effective Stress Tests", Pentech Press, London, 1238 pp.

JEZEQUEL J.-F. , 1969, "Les pénétromètres statiques - Influence du mode d'emploi sur la résistance de pointe", Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 36, janv-fév., pp. 151-160.

JEZEQUEL J.-F. , LEMASSON H. , TOUZE J. , 1968, "Le pressiomètre Louis Ménard", Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 32, juin-juil., pp. 97-120.

JOSSEAUME H. , RAT M. , LAVION F. , JOREZ J.-C. , DE RAGUENEL A. , 1970, "Mesure du coefficient de perméabilité du sol en place (essais de pompage, Lefranc, Lugeon)", Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, numéro spécial, Hydraulique des sols, 246 pp.

KERGOET M. , 1986, "Mise au point d'une méthode rapide d'identification des sols", Rapport LPC GT11, 28 pp.

LAGRANGE M. , PERRIN J. , MAGNAN J.-P. , 1980, "Classification géotechnique des sols. Mécanisation du test de Von Post pour les sols organiques", Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 105, janv.-fév., pp. 53-56.

LEFLAIVE E. , "Les limites d'Atterberg et le pénétromètre à cône", Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 50, janv.-fév., pp. 123-131.

LEMASSON H. , 1966, "Un exemple d'utilisation du scissomètre de chantier", Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 20, août, pp. 114-124.

PAREZ L. , 1963, "Les pénétromètres et leur utilisation", Journées des Fondations LCPC, 6-11 mai.

PAUTE J.-L. , MACE Y. , 1968, "Le pénétromètre de consistance", Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 33, août-sept., pp. 105-116.

PERRIN J. , 1974, "Classification des sols organiques", Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 69, janv.-fév., pp. 39-47.

STEIN D. , MOLLERS K. , BIELECKI R. , 1989, Microtunneling, Installation and Renewal of Nonman-size Supply and Sewage Lines by the Trenchless Construction Method, Ch. 2.7, "geology and hydrogeology", Ernst und Sohn, pp. 10-33.

American Society for Testing Materials (ASTM), 1988, "Advanced triaxial testing of soil and rock", STP 977.

"Essais au bleu de Méthylène", recueil d'articles, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 1990, 80 pp.

Note d'Information Technique LCPC, 1969, "La reconnaissance des sols", 42 pp.

Note d'Information Technique LPC, 1977, " Mesure en place de la pression interstitielle", 16 pp.

Projet de DTU, "Etude géotechnique et reconnaissance des sols", Revue Française de Géotechnique, N° 22, février 1983, 152 pp.

Normes AFNOR

Série NF P 94-050 à 057, 059, 070 à 074, 077, 090 à 092, 110 à 117, 119, 120, 130 à 133, 157

Série NF T 90-006, 009, 011, 014

Méthodes d'essais LPC

Méthodes d'essais n° 13, 15, 18, 19, 21 et 22.

Projets de Méthodes d'essais n° 6 et 7.

Modes opératoires

Mode opératoire G2, 1970, Dunod, (Analyse granulométrique par tamisage).

Mode opératoire MSL4, 1970, Dunod, (Essai triaxial).

Mode opératoire CT1, 1970, Dunod, (Essai Proctor).

ANNEXES

- Tableau 1- BESOINS ET MOYENS DE RECONNAISSANCE POUR LES TRAVAUX SANS TRANCHEE

(1)

TECHNIQUES DE CREUSEMENT	TYPES D'OUVRAGES MIS EN OEUVRE	BESOINS EN RECONNAISSANCE	MOYENS DE RECONNAISSANCE GEOTECHNIQUE	MOYENS DE RECONNAISSANCE GEOPHYSIQUE
NOUVELLES INSTALLATIONS		. Nature du terrain*	. Enquête géologique, sondages	Sismique réfraction, radar, RMT, résistivimètres, conductivimètre
Microtunnelier Ø 300 à 1200 mm	Tuyaux béton armé ou âme tôle grés acier fonte ductile fibre ciment plastique renforcé verre	. Caractéristiques physiques et mécaniques des terrains : aptitude au creusement		
Profondeur 90 % entre 2 et 10 m		- granulométrie*	- granulométrie/sédimentométrie	
Longueur courante d'un tronçon 30 à 150 m		- poids volumiques	- mesures de poids volumiques	
		- densité relative	- détermination de l'indice de densité	
Puits & massif de réaction	pour : assainissement, eaux usées eaux pluviales eau potable	- teneur en eau	- mesure de teneur en eau	
		- plasticité*	- détermination des limites d'Atterberg	
	Gaine pour : eau potable gaz, etc.	- susceptibilité au collage	- limites d'Atterberg, valeur au bleu,	
		- perméabilité	- mesure de k (laboratoire, in situ)	
	Puits -----> regard	- résistance	- essai triaxial (UU, CU + u), Rc, pressiomètre, SPT, CPT	
	Massifs de réaction	- déformabilité	- essai triaxial, pressiomètre	
		- fluage	- essai de fluage	
		- gonflement	- limites d'Atterberg, valeur au bleu oedomètre, essais Huder-Amberg	
		- abrasivité	- essais d'abrasivité	
		- dureté	- essais de dureté	
		. Présence de nappe d'eau souterraine*	. Piézomètres	Radar, résistivimètres, conductivimètre
		. Nature chimique de l'eau (boue, corrosion des conduites)	. Analyses chimiques	
		. Repérage des ouvrages existants* connus (x, y, z) essentiellement collecteur d'assainissement.		Radar, RMT, tomographie sismique, conductivimètre

*** Objectifs prioritaires**

- Tableau 1- BESOINS ET MOYENS DE RECONNAISSANCE POUR LES TRAVAUX SANS TRANCHEE

TECHNIQUES DE CREUSEMENT	TYPES D'OUVRAGES MIS EN OEUVRE	BESOINS EN RECONNAISSANCE	MOYENS DE RECONNAISSANCE GEOTECHNIQUE	MOYENS DE RECONNAISSANCE GEOPHYSIQUE
		. Recherche des obstacles inconnus* : - anciennes fondations - carrière - importants blocs rocheux (1/3 du Ø du tunnelier) - ouvrage abandonné	Reconnaissance au niveau des puits Consultation de données géologiques	Radar, RMT, résistivimètres, conductivimètre, microgravimétrie (cavités)
Fusée pneumatique (Impact Moling)	Tuyaux P.V.C. pour : - assainissement - fourreau PTT et EDF Tuyaux PE pour : Ø 20 à Ø 150 Profondeur 1,00 m, 1,50 m ou 10 à 15 m - eau potable - gaz	. Connaissance sommaire du terrain* : - stratigraphie générale - présence de blocs . Localisation des ouvrages existants* (x,y,z), PTT, EDF-GDF, eau, assainissement, branchements divers	Reconnaissance au niveau des puits Consultation de données géologiques	RMT, radar, résistivimètres, conductivimètre Détection électromagnétique des réseaux métalliques, RMT
Forage à la tarière (Auger Boring) Ø 100 à 1000 mm Longueur 10 à 80 m	Tuyaux acier pour fourreau Tuyaux P.V.C. et fibre ciment pour assainissement	. Connaissance sommaire du terrain* : - stratigraphie générale - présence de blocs - plasticité . Localisation des ouvrages existants* (x, y, z) . Localisation des obstacles inconnus*	Reconnaissance au niveau des puits Consultation de données géologiques Détermination des limites d'Atterberg	RMT, radar. résistivimètres, conductivimètre Détection électromagnétique des réseaux métalliques
Battage de tube (Pipe Ramming) Possibilité : Ø 1000 mm sur 50 m à 2 à 5 m de profondeur	Tuyaux acier servant de fourreau pour gaz, eau, assainissement, câbles, etc.	. Connaissance sommaire du terrain* : - stratigraphie générale - présence de blocs - plasticité . Localisation des ouvrages existants* (x, y, z) . Localisation des obstacles inconnus*	Consultation de données géologiques Détermination des limites d'Atterberg	Radar, RMT, résistivimètres, conductivimètre, sismique réfraction et tomographies sismiques éventuelles. Détection électromagnétique des réseaux métalliques

* Objectifs prioritaires

- Tableau 1- BESOINS ET MOYENS DE RECONNAISSANCE POUR LES TRAVAUX SANS TRANCHEE

TECHNIQUES DE CREUSEMENT	TYPES D'OUVRAGES MIS EN OEUVRE	BESOINS EN RECONNAISSANCE	MOYENS DE RECONNAISSANCE GEOTECHNIQUE	MOYENS DE RECONNAISSANCE GEOPHYSIQUE
Forage horizontal dirigé grande distance (horizontal directional drilling) Ø important (800 mm) Longueur 1200 m	Tuyaux acier ou PEhd pour eau, gaz, hydrocarbures, câbles.	. Nature du terrain* . Caractéristiques du terrain - granulométrie* - poids volumiques - densité relative - teneur en eau - plasticité - perméabilité - résistance . Présence de nappe d'eau souterraine . Repérage des ouvrages existants* . Recherche des obstacles inconnus* . Aptitude à la foration des terrains	. Enquête géologique, sondages - granulométrie/sédimentométrie - mesures de poids volumiques - détermination de l'indice de densité - mesure de teneur en eau - détermination des limites d'Atterberg - mesure de k (laboratoire, in situ) - esai triaxial (UU, CU + u), Rc, pressiomètre, SPT, CPT . Piézomètres . Enregistrement des paramètres de forage de reconnaissance	Radar, RMT, résistivimètres, conductivimètre, sismique réfraction et tomographie sismique Détection électromagnétique des réseaux métalliques + méthodes géophysiques aquatiques le cas échéant (électrique, sismique, bathymétrie)
Forage horizontal dirigé moyenne distance 200 m (guided drilling) Ø 50 à 200 mm Profondeur 1,00 à 1,50 m	Tuyaux PEhd pour gaz et eau Fourreau pour câbles Câbles	. Nature du terrain* . Caractéristiques du terrain déterminant le mode de creusement : hydro-jets, compactage, fraisage - granulométrie* - poids volumiques - densité	. Enquête géologique . Sondages - granulométrie/sédimentométrie - mesures de poids volumique - détermination de l'indice de densité	Sismique réfraction. Radar, RMT, résistivimètres, conductivimètre, méthodes en sites aquatiques le cas échéant (cf. supra.)

* Objectifs prioritaires

- Tableau 1- BESOINS ET MOYENS DE RECONNAISSANCE POUR LES TRAVAUX SANS TRANCHEE (4)

TECHNIQUE DE CREUSEMENT	TYPES D'OUVRAGES MIS EN OEUVRE	BESOINS EN RECONNAISSANCE	MOYENS DE RECONNAISSANCE GEOTECHNIQUE	MOYENS DE RECONNAISSANCE GEOPHYSIQUE
		- teneur en eau - plasticité - perméabilité - résistance . Repérage précis des ouvrages existants* . Aptitude à la foration des terrains . Recherche des obstacles inconnus*	- mesure de teneur en eau - détermination des limites d'Atterberg - mesure de k (laboratoire, in situ) - essai triaxial (UU, CU + u), Rc, pressiomètre, SPT, CPT . enregistrement des paramètres de forage	Sismique réfraction, radar, RMT, résistivimètres, conductivimètre, méthodes en sites aquatiques le cas échéant (cf. supra.), détection électromagnétique des réseaux métalliques
<u>REMPLACEMENT PLACE POUR PLACE</u> Eclatement de conduite (pipe bursting) 60 à 500 mm	Tuyaux PEhd pour gaz et eau Assainissement Gainé PVC	. Connaître l'environnement immédiat de la conduite existante en particulier les ouvrages existants et les branchements les plus proches		Diagraphies en canalisations existantes Radar, RMT, résistivimètres, conductivimètre Détection électromagnétique
Extraction de conduite	Tuyaux PEhd pour gaz et eau Gaine PVC	. Connaître l'environnement immédiat de la concuite existante en particulier les ouvrages existants et les branchements les plus proches		Diagraphies en canalisations existantes Radar, RMT, résistivimètres, conductivimètre Détection électromagnétique
Mange tube (pipe eating)	Tuyaux béton armé ou âme tôle grès acier fonte ductile fibre ciment plastique renforcé verre	. Connaître l'environnement immédiat de la conduite existante en particulier les ouvrages existants		Diagraphies en canalisations existantes Radar, RMT, résistivimètres, conductivimètre Détection électromagnétique

* Objectifs prioritaires

TABLEAU 2

METHODES GEOPHYSIQUES DE RECONNAISSANCES

METHODE	PRINCIPE	DOMAINE APPLICATION	LIMITATIONS	PROGRES ATTENDUS
RADAR	Réflexion d'impulsions électromagnétiques sur les discontinuités du terrain	o Réseaux métalliques ou non o Structure géologique o Obstacles enterrés divers, artificiels ou naturels. Avantages : o haute résolution o section continue o rapide, mise en oeuvre peu gênante o méthode déjà mise en oeuvre	o Mise en oeuvre par un spécialiste o Interprétation par un spécialiste o Interprétation souvent délicate en zone hétérogène o Pénétration : - 1 à 2 m pour réseaux de 0 20 mm - très affectée par l'argile, difficile à prévoir	o Matériels dédiés simples d'emploi, avec interprétation assistée, voire automatique pour certaines applications o Extraction de données quantitatives aidant à classer les terrains o Caractérisation voire identification des réflecteurs o Pénétration accrue de 50 à 100 % o Réseaux d'antennes pour imagerie 3D o Gestion automatique de la position des mesures.
RADAR DE FORAGE (RDF)	Même principe	Même domaine d'application que le radar au sol, mais la méthode est peu employée en génie civil. Peut être mise en oeuvre dans des forages verticaux ou horizontaux	o Mise en oeuvre complexe o Absence d'expérience pour l'application aux travaux sans tranchée o Le matériel existant n'est pas adapté aux faibles portées	o Elargissement des applications o Développement d'antennes UHF
TOMOGRAPHIE RADAR	Inversion des temps de trajet ou de l'atténuation d'ondes radar à travers la zone à étudier	o Etude de la structure géologique o Portée de 5 m (argile) à 100 m (granite)	Résolution 1 à 5 m o Matériel cher et délicat d'emploi o Interprétation géologique non évidente o Méthode aveugle aux profondeurs inférieures à la moitié de la distance entre les forages.	Matériels adaptés aux plus hautes résolutions Développement de la méthode
TOMOGRAPHIE ELECTROMAGNE-TIQUE dans la bande 200 MHz	Inversion des phases ou de l'atténuation d'ondes électromagnétiques à travers la zone à étudier	o Etude de la structure géologique o Portée de 5 m (argile) à 20 m (granite) o Détection de cavités souterraines	o Méthode aveugle aux profondeurs inférieures à la moitié de la distance entre les forages	Méthode en cours de développement

RADIO-MAGNETO-TELLURIQUE (Radio-MT)	Mesure d'un champ électromagnétique issu d'un émetteur de radiodiffusion (mesure de la résistivité apparente)	o Identifications géologiques des terrains o Obstacles enterrés divers, métalliques ou non Avantages : o Bonne résolution latérale o Profils continus o Très rapide, mise en oeuvre peu gênante o Faible coût o Aucune contre-indication d'ordre géologique	Profondeur d'investigation mal contrôlée Perturbation par les réseaux métalliques (peut être un avantage)	Méthode déjà au point
CONDUCTIVIMETRIE SLINGRAM	Emission et réception magnétique. Mesures de la conductivité électrique et parfois de la susceptibilité	o Identification géologique objets et obstacles métalliques Avantage : o rapidité et facilité de mise en oeuvre	perturbés par les objets métalliques	Multicapteur débouchant sur plusieurs profondeurs d'investigation simultanée
PROSPECTION ELECTRIQUE PAR COURANT INJECTE... Profilage Sondage Multiélectrodes	Mesure de la résistivité apparente par injection de courant et mesure de différence de potentiel	o Identification géologique des terrains Avantages : o Maîtrise de la résolution latérale et verticale et de la profondeur d'investigation o Possibilité de profilage continu o Faible coût o Pas de contre-indication géololique	Nécessité d'un bon contact électrique avec le sol, d'où difficulté en milieu urbain	Méthode bien au point
PROSPECTION ELECTRIQUE PAR QUADRIPOLE ELECTROSTATIQUE	Mesure de la résistivité apparente par injection de courant et mesure de différences de potentiel (courant alternatif de fréquence de 10 kHz à 500 kHz)	o Identification géologique des terrains Avantages : o Utilisable sur recouvrement isolant o Bonne résolution latérale o Profils continus o Très rapide, mise en oeuvre peu gênante o Faible coût o Pas de contre indication géologique o Profondeur d'investigation réglable	o Expérience limitée	Interprétation automatique en temps réel.

DETECTION ELECTROMAGNETIQUE	Création de courants de Foucault, mesure du champ induit	o Détection et localisation des réseaux métalliques o Aisé à mettre en oeuvre et efficace o Mise en oeuvre par concessionnaires et entreprises de travaux	o Portée de quelques mètres	
TOMOGRAPHIE ELECTRIQUE	Mesures de potentiel électrique, à partir d'un réseau d'électrodes entourant plus ou moins la zone à étudier	o Etude de la structure géologique o Efficace pour la fracturation o Portée de 0 à 100 m réglable	o Forages crépinés ou non tubés en eau o Demande une bonne accessibilité o Interprétation délicate o Résolution 10 à 20 % de la taille du dispositif o Rendement moyen	Matériel de mesure plus performant Inversion automatique rapide.
SISMIQUE REFRACTION	Réfraction d'ondes sismiques	o Caractéristiques mécaniques des terrains o Recherche de substratum	o Suppose un environnement plus ou moins tabulaire o Explosif parfois nécessaire o Délicat voire impossible en ville o Mauvaise résolution horizontale	Amélioration des sources sismiques : emploi plus souple
SISMIQUE TRES HAUTE RESOLUTION	Réflexion d'ondes sismiques, S en particulier	o Caractéristiques mécaniques des terrains très meubles o Structure des terrains, obstacles	o Résolution d'environ 3 m dans les meilleurs cas	o Développement de la méthode
TOMOGRAPHIE SISMIQUE	Inversion de temps de trajet d'ondes sismiques à travers la zone à étudier (ondes P ou ondes S)	Caractérisation mécanique des terrains. Résolution moyenne de 50 cm à 1 m. Mise en oeuvre entre forages ou entre le sol et le forage, entre galeries Portée : selon le matériel et la compacité de la roche, de 10 m à plus de 100 m	o Certaines zones lentes peuvent être occultées o Demande une bonne couverture angulaire par les trajets de mesure (accessibilité) o Mise en oeuvre délicate o Rendement moyen o Coût élevé	Interprétation immédiate
MICROGRAVIMETRIE	Variations locales du champ de pesanteur	o Recherche de vides, de reliefs du substratum et de zones décomprimées	o Mauvaise résolution o Rendement faible o Difficile en ville	
DIAGRAPHIES	Mesure de paramètres physiques en forage	Caractérisation locale des terrains	o Emploi assez lourd sauf pour la radioactivité naturelle	Amélioration progressive du matériel. Adaptation aux forages horizontaux

METHODES DE RECONNAISSANCES EN SITE AQUATIQUE (eaux intérieures)

METHODE	**PRINCIPE**	**DOMAINE APPLICATION**	**LIMITATIONS**	**PROGRES ATTENDUS**
SISMIQUE REFLEXION	Réflexion d'impulsions mécaniques sur les discontinuités du terrain	o Caractérisation géométrique des structures géologiques Avantages : o Section continue obtenue en temps réel o Rapide, mise en oeuvre peu gênante o Méthode bien connue	Ne s'applique pas s'il y a moins de 10 m d'eau, si le fond est constitué de vases contenant du gaz	
SISMIQUE REFRACTION AQUATIQUE	Mesure des temps de trajet d'ondes mécaniques se propageant le long du trajet en réfraction totale le long de discontinutés planes du terrain	o Caractérisation géométrique et mécanique (vitesse des ondes élastiques) des structures géologiques Avantages : o Obtention d'une coupe de terrain indiquant les variations des propriétés mécaniques	o Mise en oeuvre assez lourde o Problèmes de couches lentes et des couches "masquées"	Progrès dans le matériel et la méthodologie de mise en oeuvre
GEOELECTRIQUE AQUATIQUE	Mesure de la résistivité apparente par injection de courant et mesure des différences de potentiel	o Caractérisation géologique et structurale du sous-sol. Avantages : o Section continue o Rapide, mise en oeuvre peu gênante o Profondeur d'investigation contrôlée	Application difficile en zone d'estuaire (masse d'eau hétérogène) et par plus de 15 m d'eau. interprétation quantitative impossible si forte non tabularité du sous-sol	Interprétation automatique sur le terrain
MAGNETOMETRIE	Mesure de l'anomalie de champ magnétique terrestre	o Détection d'obstacles ferreux (épaves, bombes, ...)	Ne détecte que les objets d'une taille appréciable	

RADIO-MAGNETO-TELLURIQUE EN SITE AQUATIQUE	Mesure d'un champ électromagnétique issu d'un émetteur de radiodiffusion (mesure de la résistivité apparente)	o Identifications géologiques des terrains o Obstacles enterrés divers, métalliques ou non Avantages : o Bonne résolution latérale o Profils continus o Très rapide, mise en oeuvre peu gênante o Faible coût o Aucune contre indication d'ordre géologique o Permet une cartographie de la résistivité par profilage transversal	Profondeur d'investigation mal contrôlée Perturbation par les réseaux métalliques (peut être un avantage)	En cours de développement

Tableau 3. Moyens de reconnaissance géotechniques

ESSAIS EN LABORATOIRE		
Essai	**Paramètres**	**Application**
granulométrie/sédimentométrie	courbe granulométrique	marinage, excavation
mesures de poids volumiques	poids volumiques	massif de réaction, puits, poussée, revêtement
mesures de perméabilité	perméabilité, k	puits, excavation
densité relative	indice de densité I_d	puits, excavation, poussée, revêtement
teneurs en eau	teneurs en eau	marinage, excavation, poussée, revêtement
limites d'Atterberg	limite de liquidité, limite de plasticité	marinage, excavation, poussée, revêtement, collage, gonflement
résistance en compression simple	résistance en compression simple, Rc	excavation
essai triaxial U U	cohésion non drainée, Cu	massif de réaction, puits, excavation, poussée, revêtement
essai triaxial C U avec mesure de u	cohésion c', angle de frottement, φ'	massif de réaction, puits, excavation, poussée, revêtement
essai triaxial C D	cohésion c', angle de frottement, φ'	massif de réaction, puits, excavation, poussée, revêtement
essai au bleu	valeur au bleu	collage, gonflement
essai d'abrasivité	abrasivité	excavation
analyses chimiques		marinage, revêtement
INVESTIGATIONS IN SITU		
Technique	**Paramètres**	**Application**
sondage carotté	nature des terrains	stratigraphie, échantillons pour essais en laboratoire
essai pressiométrique	module pressiométrique, pression limite Pl	massif de réaction, puits, poussée
essai SPT	nombre de coups SPT, N	massif de réaction, puits, poussée
essai CPT	résistance de pointe, frottement latéral	massif de réaction, puits, poussée
essai de perméabilité	perméabilité, k	puits, excavation
mesure piézométrique	niveau piézométrique	pressions interstitielles



Comité Français pour les Travaux Sans Tranchée
3, rue Berri 75008 PARIS
Tél: 43.59.95.61 - Fax: 43.59.95.60

IMP. Bruno DUQUENOY R.C.S. A 389 080 508